

Аналіз моделей та одиниць виміру яскравості світлового забруднення атмосфери.

Семків Юрій Мирославович, Андрійчук Володимир Андрійович, Осадца Ярослав Михайлович Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя
Касеркевич Валерій Станіславович, Львівський національний університет імені Івана Франка.

Дана робота виконана в рамках співпраці між астрономічною обсерваторією Львівського національного університету імені Івана Франка та Тернопільським державним технічним університетом імені Івана Пулюя по дослідженню світлового забруднення атмосфери. В наших роботах, надрукованих в журналі "Світло" [1,2], автори звертали увагу на актуальність проблеми світлового забруднення атмосфери.

Постановка наукової проблеми та її значення.

Явище світлового забруднення виникає внаслідок напрямленого вгору штучного світла. Світлове забруднення – освітлення нічного неба штучними джерелами світла, світло яких розсіюється в нижніх шарах атмосфери. Іноді це явище також називають світловим смогом. Основними джерелами світлового забруднення є великі міста і промислові комплекси. Серед наземних обсерваторій найбільш темне небо на обсерваторії Мауна Кеа на Гавайських островах. Обсерваторія розташована на висоті 4700 м. Там яскравість неба дорівнює 23^m /кв.секунди ($5,8 \cdot 10^{-5}$ кд/м²). На більшості обсерваторій яскравість неба в $22,5^m$ /кв. секунди (10^{-4} кд/м²) вважається чудовою.

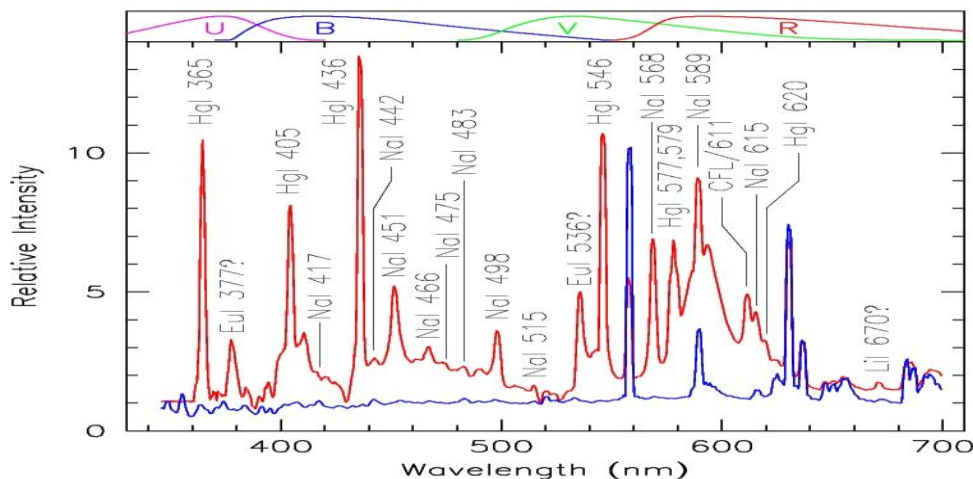


Рис.1.- Видял спектрів забрудненого неба - (червоний) , чистого неба -(синій).

Штучне освітлення не повинно збільшувати яскравість фону яку вимірюють на висоті 45^0 більше ніж на 10% ($10^7/4\pi$ фотонів $\text{nm}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) або $174 \mu\text{cd}/\text{m}^2$

Одним з наслідків надмірного використання штучного світла є втрати енергії.

"Міжнародна асоціація темного неба" стверджує, що на нічне освітлення по всьому світу щорічно витрачається понад 1,5 млрд. доларів США, а також виробляється більш ніж 12 млн. тон діоксиду вуглецю (CO_2), що веде до створення парникових газів. В середньому, одна лампа вуличного освітлення споживає 400 Вт, таким чином, за 8 годин роботи кожної лампою витрачається 3,2 кВт·год електроенергії. Світлове забруднення не просто астрономічна чи екологічна проблема, а й гостре питання енергоефективності. Економічні витрати від засвітлення верхньої півсфери простору становлять мільярди євро щорічно. За даними досліджень компанії Philips, одна лише заміна застарілих конструкцій світлових приладів і джерел світла може зменшити викиди CO_2 на 3,5 млн. тон щорічно. Економічно це еквівалентно зниженню щорічних

витрат на 700 млн. євро навіть при тому, що частина заощаджень будуть витрачені на сам процес заміни ламп.

Мета цієї роботи – моделювання світлового забруднення з врахуванням метеорологічних умов і структури джерел світла міст, аналіз примінення існуючих одиниць виміру яскравості.

Яскравість неба, як і слабких протяжних об'єктів, можна виражати в світлових, енергетичних одиницях - застосовується в звичайних фотометричних розрахунках та астрофізичних (зоряних величинах на квадратну секунду mag/sec^2) -використовується тільки в астрофізиці. Блиск зорі – міра освітленості, створювана зорею на приймачі світлової енергії, наприклад у нашому оці; вимірюється в зоряних величинах. Помилково як синонім застосовують термін видима яскравість. Для вимірювання блиску небесних світил одиниця освітленості (люкс) зовсім непридатна, так як дуже мала у порівнянні з мізерними світловими потоками. Прийнято, що при різниці в одну зоряну величину видимий блиск (яскравість) зір відрізняється у 2,512 рази. Яскравість зір 6-ї величини в 100 раз менша за яскравість зір 1-ї величини. Ще яскравіші зорі мають від'ємну зоряну величину. Зоряні величини прийнято позначати латинською літерою m (першою літерою слова *magnitude* – величина), що ставиться як степінь справа вгорі від цифри, яка вказує її числове значення, наприклад 5^m . Шкала зоряних величин встановлюється рівнянням:

$$m = -2,5 \lg E - 13,89 \quad (1)$$

де E – освітленість в лк.

За 0^m -пункт шкали зоряних величин приймають зірку, що створює освітленість $2,77 \cdot 10^{-10}$ люмен/см²(фот) або $4,07 \cdot 10^{-6}$ ерг/см² · с. або $2,48 \cdot 10^{-8}$ Вт/м². Відмітимо, що зорі 0 зоряної величини всіх спектральних класів в фотометричній системі V(спектральний діапазон від 0,42 до 0,68 мкм)на довжині хвилі 0,556 мкм. Характерної ширини спектра $\Delta\lambda = 1000$ Ангстр., створюють світловий потік :

$$n(0) = 1000 \text{ фот/ см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{\AA} \quad (2)$$

Число фотонів від зірки величини m :

$$n(m) = 10^{-0,4m+3} \text{ фот/ см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{\AA} \quad (3)$$

Середнє значення яскравості фону темного неба складає приблизно 21,5 зоряної величин из квадратної секунди(mag/sec^2), що відповідає інтенсивності – $2,5 \cdot 10^{-3}$ квант/см² · с· кв сек дуги ($1,6 \cdot 10^{-6}$ квант/см² · с· кв сек дуги· А).

Щоб яскравість, виражену в астрофізичній величині (mag/sec^2) перевести СІ (кд/м²)або CGS (наноламберт), можна скористатися формулами:

$$L_v = 34,08 \cdot e^{(20,723-0,92104 V)} \text{ (наноламберт)} ;$$

$$L_v = 10,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{(-0,4 V)} \text{ (кд/м}^2\text{)} \quad (4)$$

де V – яскравість неба в зеніті в астрофізичних одиницях (mag/sec^2),

L_v — яскравість в кд/м² або в наноламбертах .

Статистичний зв'язок між світловою яскравістю B (стільб) та астрофізичною яскравістю m (mag/sec^2) :

$$m = 2,39 - 2,5 \log(B). \quad (5)$$

Освітленість E припадає приблизно на площу в $(1')^2$ або $\approx 3600''$ квадратних секунд дуги неба. Одна квадратна секунда дуги $\omega \approx 2,35044305 \cdot 10^{-11}$ стерadian. Отже, яскравість $B(\text{кд/м}^2)$ з одної квадратної секунди дуги становить:

$$B = E_0 / (3600'' \cdot \omega \cdot 2,5^m) ; \quad (6)$$

де E_0 – освітленість зоряної величини $m=0$ $E_0 = 2,77 \cdot 10^{-6}$ лк. ;

m - астрофізична яскравість, (mag/sec^2) :

В енергетичних одиницях світлова яскравість N_m :

$$N_m = E_0 \cdot N_{ph} [1\text{лк}] / (3600'' \cdot 2,5^m) = 0,409 \cdot 10^{16} \cdot E_0 / (3600'' \cdot 2,5^m) \text{ фот} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кв сек дуги};$$

де при $\mu = 555 \text{ нм}$ число фотонів, падаючих на поверхню в 1 м^2 при освітленості в 1 лк рівне: $N_{ph} [1\text{лк}] = N_{ph} [1\text{лм}] / \text{м}^2 = 0,409 \cdot 10^{16} \text{ фот} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

$$\text{або } N_m = E_0 \cdot N_{ph} [1\text{лк}] / (3600'' \cdot 2,5^m) = 0,409 \cdot 10^{12} \cdot E_0 / (3600'' \cdot 2,5^m) \text{ фот} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{кв сек дуги}$$

Табл.1.-Енергетична та світлова величина яскравості, у відповідності з системою СІ та Міжнародним світлотехнічним словником

Енергетичні					Світлові			
Назва	Символ	Одиниця виміру			Назва	Символ	Одиниця виміру	
		Україна	Система СІ	Квантовий аналог			Україна	Система СІ
Енергетична яскравість	L_e	Вт/ср*м ²	W/sr*m ²	$N_{ph}/sr \cdot m^2 \cdot s$ (кількість фотонів в тілесном куті в 1ср на 1м ² в секунду)	Яскравість	L_v	лм/ср*м ² = кд/м ² = нит	lm/sr*m ² = cd/m ² =nit

Табл.2. Позасистемні одиниці яскравості, що використовують при визначенні світлового забруднення

Енергетичні			Світлові		
Назва	Символ	Одиниці виміру	назва	Символ	Одиниці виміру
		1 фотон нм ⁻¹ см ⁻² сек ⁻¹	Ламберт	Лб	1Лб=3183 кд/м ² 1 Лб = 10 ⁴ асб = 1/ π сб = 3183 кд/м ²
		1Вт/(м ² ·ср· мкм)	1milli-lambert		= 10/π cd/m ²
		1ерг/(см ² ·сек· стерад· Å).	1 skot		1 milli-blondel = 1E-3/π nit = 1E-7 lambert
		1квант/см ² ·сек· кв сек дуги· Å	Стильб	Сб	1Сб=1 кд/см ² =10 ⁴ кд/м ²
			Апостильб (блондель) (з 1978 року офіційно рахується як устарівша)	асб	1асб=10 ⁴ /(4· π)сб = 1/ π кд/м ²
		Англійські одиниці English units			
		(SI unit) W m ⁻² ster ⁻¹ A ⁻¹	1 cd/ft ²		10.76 nit
		CGS unit erg cm ⁻² s ⁻¹ ster ⁻¹ A ⁻¹ CGS units photons cm ⁻² s ⁻¹ ster ⁻¹ A ⁻¹	1 foot-lambert		1/π cd/ft ² =3.426 nit

		SI unit $\text{W m}^{-2} \text{ A}^{-1}$ CGS unit $\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ A}^{-1}$ photons $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ A}^{-1}$			
		<p>перерахунок:</p> $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ ср мкм}) =$ $= 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{мкм}) =$ $= 0,1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{Å}).$ <p>При перерахунку довжини хвилі в частоту слід враховувати спектральну ширину випромінювання</p> $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ ср мкм}) =$ $\text{с} \lambda^{-2} 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ стер Гц})$ C – швидкість світла.			
S10vis		$1 \text{ S10vis} = 1,05 \cdot 10^{-13} (\text{Вт}/\text{см}^2 \cdot \text{стер})$ $1 \text{ S}_{10} \text{ vis} = 1 \text{ 10th mag star/deg}^2$ $= 10.00 \text{ mag/deg}^2$ $= 27.78 \text{ mag/arcsec}^2$ $= 2.3 \times 10^{-7} \text{ millilambert}$ $= 7.2 \times 10^{-11} \text{ stilb}$ $= 3.6 \times 10^{-3} \text{ rayleigh/angstrom at 5500Å}$			

Вводиться ще одна одиниця яскравості неба - одиниця **S10vis** для визначення величини світлового забруднення, обумовлена як число зірок зоряної величини 10^m на квадратний градус дуги, що дають яскравість еквівалентну спостерегаємій. Ця величина відноситься до зірок класу A0, які мають приблизно постійну світність в широкому діапазоні довжин хвиль видимого ділянки спектра.

Яскравість природного нічного неба коливається в діапазоні 100 – 1000 в одиницях S10vis.

$$1 \text{ erg/cm}^2/\text{s/ster/A} = 7.62\text{E}8 \text{ S10vis} = 3.35\text{E}6 \text{ Rayleigh/A}$$

$$1 \text{ S10vis} = 4.40\text{E}^{-3} \text{ Rayleigh/A} = 1.31\text{E}^{-9} \text{ erg/cm}^2/\text{s/ster/A}$$

$$1 \text{ Rayleigh/A} = 227 \text{ S10vis} = 2.98\text{E}^{-7} \text{ erg/cm}^2/\text{s/ster/A}$$

Табл.3. - Залежність між величинами яскравості в **mag/arcsec²**, **S10vis**, **нт**.

Яскравість (в зоряних величинах на квадратну секунду дуги)	Яскравість, S10vis	Яскравість, нт	
		Всередині атмосфери	Поза атмосферою
(mag/arcsec ²)			
+0	1,3E+11	9,0E+4	10.9E+4
+5	1,3E+9	9,0E+2	10.9E+2
+10	1,3E+7	9,0	10.9
+15	1,3E+5	9,0E-2	10.9E-2
+20	1,3E+3	9,0E-4	10.9E-4
+25	1,3E+1	9,0E-6	10.9E-6

Табл.4 - Залежність між величинами яскравості

Світлове забруднення в $S_{10 \text{ vis}}$	Без врахування природного фону неба в mag/arcsec^2	З врахування природного фону неба в 250 S_{10}	
		mag/arcsec^2	mag/deg^2
0	--	21.7	4.0
20	24.5	21.6	3.9
50	23.5	21.5	3.8
100	22.8	21.4	3.7
200	22.0	21.1	3.4
320	21.5	20.9	3.2
500	21.0	20.6	2.9
1000	20.2	20.0	2.3
2000	19.5	19.4	1.7
5000	18.5	18.5	0.8
20000	17.0	17.0	-0.7

$1 S_{10} = 1 \text{ 10th mag star/deg}^2$
 $= 10.00 \text{ mag/deg}^2$
 $= 27.78 \text{ mag/arcsec}^2$
 $= 2.3 \times 10^{-7} \text{ millilambert}$
 $= 7.2 \times 10^{-11} \text{ stilb}$
 $= 3.6 \times 10^{-3} \text{ rayleigh/angstrom at 5500\AA}$

Аналіз моделей світлового забруднення. Існують такі основні моделі світлового забруднення:

- фотометрична статистична модель світлового забруднення :

$$V = 29 + 0.02 \cdot r + 2.5 \cdot \log(r^2/N); \quad (7)$$

де: V- яскравість в зеніті в (mag/sec^2) ;

r – віддаль від населеного пункту в км.,

N – число жителів.

- модель Уолкера :

$$I = 0,01 \cdot N \cdot r^{-2,5};$$

$$L = 11300000 \cdot N \cdot R^{-2,5}; \quad (8)$$

I – % перевищення світлового забруднення над фоном неба;

L – яскравість неба в зеніті в нано ламберт;

R - віддаль в метрах;

N – число жителів.

- модель Шейфера

$$m_{\max} = 8,68 - 1,2 \text{ kv} - 5 \cdot \lg(1 + 0.158 V^{1/2}), \quad (9)$$

где V – яркость неба в наноламбертах (нЛБ) в фотометричній полосі V,

kv – коеф. екстинкції.

Недолік цих моделей полягає в тому, що не враховується метеорологічні умови і тип освітлення міст. Розглянемо модель, яка враховує кількість, типи джерел світла, їх світлотехнічні характеристики, а також метеорологічну дальність видимості

Сумарне споживання електроенергії в електричних освітлювальних установках складає 1066 ТВт-год (2016 ТВт- год – світове споживання електроенергії). В розвинених країнах на освітлення використовується від 5 до 15 % всієї електроенергії (з них на транспорт та зовнішнє освітлення – 48%, на житлове – 28%). Освітлена площа вулиць та тротуарів в розрахунку на 100 тис. населення міста становить приблизно 800 тис. м². Встановлення потужність вуличного освітлення в перерахунку на одного жителя становить 13 - 20 Вт.

У глобальному масштабі електроенергія, що йде на освітлення, розподіляється приблизно в такий спосіб: 28% - житловий сектор, 48% - сектор обслуговування, 16% - промисловий сектор, 8% - вуличний та інші види освітлення.

В індустріальних країнах витрати електроенергії, що йде на освітлення, коливаються в діапазоні від 5 до 15%, у той час, як у країнах, що розвиваються, цей показник доходить до 85%.

В Україні споживається близько 180 млрд. кВт·год. електроенергії. Якщо прийняти, що частка споживаної електроенергії на освітлення в Україні складає 15%, то річне споживання складе 27 млрд. кВт·год.

Табл.5. Середня кількість типів ламп для освітлення міста (на 100 тис. населення)

Тип лампи	Кількість, <i>Ni(на 100 тис. населення)</i>
Лампи розжарювання	800
Люмінесцентна лампа	730
Ртутна лампа високого тиску	748
Натрієва лампа високого тиску	1960
Металогалогенна лампа	83
Світлодіодні	404
Кількість світлоточок зовнішнього освітлення на 1 км мережі	22
Протяжність мереж зовнішнього освітлення (на 100 тис населення), км	213
Освітлена площа (на 100 тис населення), км ²	0,93
Кількість світлоточок зовнішнього освітлення на 100 тис населення	4686

Табл.6. Параметри сучасних джерел світла для загального освітлення

Тип ламп	P, Вт	η, лм/Вт	Ra	Ткол, К	τ, год
ЛР (230 В)	15-200	10-15	100	2400-2700	1000
ГЛР	20-50	До 30	100	3000	4000
ЛЛ Т5	14-35	92-104	80	2700 3000 4000 6000	2000
КЛЛ	5-57	До 75	80		8000-15000
МГЛ	35-3500	До 100	80 90	3000 4200 6000	До 15000
НЛВТ	50-1000	До 150	20	2000	До 32000
Світлодіоди	До 0,2 до 1	До 20 (білий.) до 50 (кол.)	80	6000	100000

Енергія кванта:

$$Q = (h \cdot c) / \mu ; \quad (10)$$

де:

c - швидкість світла в вакуумі ($2,998 \cdot 10^8$ м/с);

h - постійна Планка ($6,62621 \cdot 10^{-34}$ Дж · с);

μ-довжина хвилі випромінювання, (м).

Енергія кванта випромінювання при $\mu = 555$ нм:

$$Q = 3,58 \cdot 10^{-19} \text{ [Дж]}. \quad (11)$$

Обернена величина відповідає числу квантів за секунду випромінювання потужністю 1 Вт при $\lambda = 555$ нм:

$$N_{ph} [1\text{Вт}] = 1 / Q = 1 / 3,58 \cdot 10^{-19} = 2,79 \cdot 10^{18} \text{ [фот / с]}. \quad (12)$$

Нижній індекс ph означає, що мова йде про фотонні величини.

Із визначення кандели слідує, що при $\lambda = 555$ нм:

$$N_{ph} [1\text{Вт}] = 683 \text{ лм}.$$

(6)

Отже, можна отримати точне значення числа фотонів при $\mu = 555$ нм за секунду в світловому потоці рівному $1 / 683$ Вт, що на данній довжині хвилі відповідає світловому потоку в 1 лм:

$$N_{ph} [1\text{лм}] = N_{ph} [1\text{Вт}] / 683 = 0,409 \cdot 10^{16} \text{ фот с}^{-1} \quad (13)$$

Використовуючи визначення одиниці освітленості, знаходимо, що при $\mu = 555$ нм число фотонів, падаючих на поверхню в 1 м^2 при освітленості в 1 лк рівне:

$$N_{ph} [1\text{лк}] = N_{ph} [1\text{лм}] / \text{м}^2 = 0,409 \cdot 10^{16} \text{ фот с}^{-1} \text{ м}^2. \quad (14)$$

Необхідно нагадати, що при довжині хвилі $\mu = 555$ нм енергетичне опромінення в $1 / 683$ Вт відповідає освітленості в 1 лк, а довжині хвилі $\mu = 630$ нм того ж випромінювання відповідає освітленості в 0,265 лк.

Фізіологічна дія в 1лм однаково по всьому спектру, але її енергетична "ціна" для зеленої області складає $1/683$ Вт, для фіолетової - $1/62$ Вт, а для малино-червоної - $1/6$ Вт.

Визначимо енергетичне яскравість L_v - (к-сть фотонів) / ($\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{стеррадіан}$), що засвічує атмосферу в zenіті:

$$L_v = N_{ph} [1\text{лм}] \cdot 10^{-4} \cdot \delta \cdot \beta \cdot \left(\sum_{i=1}^{i=z} f_i \cdot N_i \cdot P_i \right) / (S \cdot 2\pi); \quad (15)$$

де S - площа освітленої частини міста, м^2 ;

$\delta = 0,01-0,3$ - коефіцієнт, що враховує відбиття світла в атмосферу;

z - кількість типів ламп;

f_i - світловіддача i-го типу лампи, лм / Вт;

N_i - кількість ламп даного типу;

β - відношення освітленої до загальної площі площі міста;

P_i - потужність електрична i-ї лампи, Вт.

Яскравість нічного неба (в світлових одиницях) можна визначити використовуючи зв'язок між освітленістю та яскравістю:

$$L_z = E \cdot \delta / \pi = (E_{пр} + E_{шт}) \cdot \delta / \pi; \quad (16)$$

де L_z - яскравість земної поверхні, нт;

δ - коефіцієнт відбиття для заданного напрямку спостереження;

E - повна освітленість поверхні, лк;

$E_{пр}$ - природна освітленість поверхні, лк;

Ешт – штучна освітленість поверхні, лк.

$\pi = 3,14$.

Табл.7 - Природна освітленість Епр. горизонтальної поверхні в нічних умовах, лк.

Повний Місяць, безхмарно	Повний місяць, суцільна хмарність	Ясна зоряна ніч	Небо без місяця, густа хмарність
0,3–0,2	0,05	0,002–0,0006	0,0003–0,0002

Якщо відома яскравість земної поверхні L_z , то яскравість неба L_v (Кандела / м²) при зенітній висоті z становить:

$$L_v = L_z \cdot (1 - P^{H_0 \cdot M(z)}) \cdot \beta / (1 + P^{H_0 \cdot M(z)}); \quad (17)$$

Або з врахуванням (16):

$$L_v = E \cdot \delta \cdot \beta \cdot (1 - P^{H_0 \cdot M(z)}) / (\pi \cdot (1 + P^{H_0 \cdot M(z)}));$$

де $\delta = 0,1-0,3$ - коефіцієнту, що враховує відбиття світла в атмосферу;

β – відношення освітленої площі міста до загальної площі;

E – освітленість земної поверхні, лк.

Коефіцієнт прозорості:

$$P = e^{-\lambda}$$

де λ - коефіцієнт ослаблення світла, км⁻¹;

де $H_0 = 4-8$ км. – висота однорідної атмосфери;

$$M(z) = \sec z;$$

(18)

де z - зенітна віддаль, град;

Основним параметром, що описує процес взаємодії оптичного випромінювання з атмосферою є метеорологічна дальність видимості (МДВ). Ця відстань, на якій світло з довжиною хвилі 0,55 мкм ослабляється в 50 разів (на 17 дБ). Співвідношення справедливе для МДВ менше 20 км. Атмосферне повітря ніколи не буває абсолютно чистим. Найчистіше повітря над океаном. Забруднене повітря над великими містами простягається на висоту 1,5 - 2,0 км., у них міститься пилу в 120-150 разів більше, ніж над океаном. Ця “щільна шапка” затримує влітку до 20-30% сонячних променів, а взимку, коли і так мало світла, поглинає половину його.

Емпірична залежність між дальністю видимості T , та коефіцієнтом ослаблення світла σ :

$$T = 3,9 \cdot \lambda^{-1}; \quad (19)$$

Табл.8. - Шкала (бали) видимості, дальність видимості та об'ємний показник розсіяння світла.

Бали видимості	Погодні умови	Дальність видимості, T , км	коефіцієнт ослаблення світла світла, λ , км ⁻¹
0	Густий туман	<0,05	>78,2
1	Звичайний туман	0,05-0,2 0,2 - 0,5	78,2-19,6 19,6-7,82
2	Легкий туман	0Ю5-1	7,82-3,91
3	Слабкий туман	1-2	3,91 - 1,96
4	Димка	2-4	1,96 - 0,954
5	Легка димка	4-10	0,954 - 0,391
6	Ясно	10-20	0,391 - 0,196
7	Дуже ясно	20-50	0,196 - 0,078
8	Добре ясно	>50	<0,078

9	Ідеальна атмосфера	277	0,0141

Повний коефіцієнт об'ємного ослаблення світла:

$$\lambda = \alpha_1(\mu) + \alpha_2(\mu) ;$$

(20)

Для молекулярного розсіювання:

(21)

$$\alpha_1(\mu)=0,0119(550/\mu)^4;$$

для аерозольного розсіювання:

$$\alpha_2(\mu)=(3,9/T-0,012)(550/\mu)^m ;$$

(22)

де μ - довжина хвилі, нм;

$$m=0,92\pm 0,25;$$

T=1 км (при тумані);

T=4 км (при димці);

T=20 км (при ясному небі).

Табл. 9. Коефіцієнт прозорості при різних атмосферних умовах.

(<http://laseritc.ru/?id=103>).

Стан атмосфери	Коеф прозорості, $P=e^{-\lambda}$	Дальність видимості, t км
Повітря абсолютно чисте	0,99	300
Надзвичайно Висока прозорість	0,97	150
Повітря дуже прозоре	0,96	100
Добра прозорість	0,92	50
Середня прозорість	0,81	20
Повітря дещо мутне	0,66	10
Повітря мутне	0,36	4
Повітря дуже мутне	0,12	2
Легкий туман	0,015	1
Туман від	$2 \cdot 10^{-4}$	0,5
до	$8 \cdot 10^{-10}$	0,2
Густий туман від	10^{-19}	0,1
до	10^{-34}	0,05

Табл.10. - Залежність коеф. розсіювання і проходження світла від довжини хвилі.

(http://1.iesod3.z8.ru/self0024/100210_aktinometria.rar)

Світло	Довжина хвилі, μ , мкм	$1/\mu^4$	Коеф. розсіюваного світла, σ	Коеф. проходящого світла, (1- σ)
Червоне	0,76-0,62	4,41	0,123	0,877
Оранжеве	0,62-0,585	7,50	0,213	0,787
Жовте	0,585 – 0,57	8,99	0,252	0,748
Зелене	0,57 – 0,51	11,76	0,329	0,671
Голубе	0,51 – 0,48	16,66	0,466	0,534
Синє	0,48 – 0,45	21,39	0,599	0,401
Фіолетове	0,45 – 0,39	32,14	0,900	0,100

Ослаблення блиску Δm (в зоряних величинах mag) зір з врахуванням світлового забруднення атмосфери:

$$\Delta m = \delta m - (2.5 \lg p) \cdot [M(z)-1] - 2,5 \cdot \lg (1 + L/L_{\text{пр}}), \quad (23)$$

δm - величина зенітного атмосферного поглинання в

різних моделях атмосфери:

в релєєвській моделі $\delta m = 0.17^m$,

в фоновій моделі аерозоля $\delta m = 0.26^m$,

в середній моделі $\delta m = 0.34^m$.

$L_{\text{пр}}$ – природна яскравість неба: $(10^7/4\pi \text{ фотонів нм}^{-1}\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1})$ або $174 \mu\text{cd}/\text{м}^2$;

L - яскравість неба від штучної засвітки;

P – коеф. прозорості атмосфери;

$M(z) = \sec z$;

де z - зенітна віддаль, град.

В загальному вигляді, частина світла що пройде через атмосферу:

$P(t) = e^{-\lambda(t) dt}$;

Частина світла, що розсіється в атмосфері :

$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda(t) dt}$

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

Отже, в даній роботі розроблений підхід до розробки параметрів математичної моделі для розрахунку світлового забруднення атмосфери, що враховує кількість населення міста, кількість та типи світильників, світловіддачу ламп, площу освітленої частини міста. На основі моделі створена комп'ютерна програма, яка зможе моделювати карту світлового забруднення.

Ключові слова: заствітленість; світлове забруднення нічного неба, методи визначення світлового забруднення нічного неба.

Джерела та література

1. Семків Ю.М., Андрійчук В.А., Касаркевич В.С. Світлове забруднення атмосфери: астрономічний аспект проблеми / Юрій Мирославович Семків, Володимир Андрійович Андрійчук, Валерій Станіславович Касаркевич // Журнал «Світло люкс». – 2010. – (Фактор світла).
2. Семків Ю. М., Андрійчук В. А. Світлове забруднення атмосфери: стан та перспективи вирішення // Журнал «Світло люкс». – 2008. - №3. – С.. 74-77. – (Фактор світла)
3. Енергосбереження та технічна політика в галузі освітлення.// Журнал «Світло люкс». – 2006. - №2. – С.. 17-19.
4. Климчик В.У.: Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп, Ленинград; Наука 1988.
5. Steve Albers, Dan Duriscoe: Modeling Light Pollution from population Data and implication for National Park Service Lands. Protecting Dark Skies.
6. М.И. Крутик, В.П. Майоров Люмены, кандели, ватты и фотоны. Различные единицы - различные результаты измерения чувствительности телевизионных камер на основе ЭОП и ПЗС

"Специальная техника", №5, 2002г.,